

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la Propiedad
Intelectual
Oficina internacional



(43) Fecha de publicación internacional
22 de diciembre de 2011 (22.12.2011)

PCT

(10) Número de Publicación Internacional
WO 2011/157882 A2

(51) Clasificación Internacional de Patentes:
G01P 15/00 (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2011/070445

(22) Fecha de presentación internacional:
20 de junio de 2011 (20.06.2011)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:
61/356,272 18 de junio de 2010 (18.06.2010) US

(71) Solicitante (para todos los Estados designados salvo US): BAOLAB MICROSYSTEMS SL [ES/ES]; Institut Politecnic del Campus de Terrassa - Mod TR25, Cta Nacional 150 Km 14,5, E-08220 Terrassa (Barcelona) (ES).

(72) Inventores; e

(75) Inventores/Solicitantes (para US solamente):
MONTANYÀ Silvestre, Josep, I. [ES/ES]; C/ Terrasa

42-44, 2on C, E-08191 Rubí (Barcelona) (ES).
FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, Daniel [ES/ES]; Riera Bonet 1, 2º2ª-A, E-08915 Molins de Rei (Barcelona) (ES).

(74) Mandatarios: ELZABURU MARQUEZ, Alberto de et al.; c/ Miguel Angel, 21, 2º, E-28010 Madrid (ES).

(81) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD,

[Continúa en la página siguiente]

(54) Title: UNSTABLE ELECTROSTATIC SPRING ACCELEROMETER

(54) Título : ACELERÓMETRO DE RESORTE ELECTROSTÁTICO INESTABLE

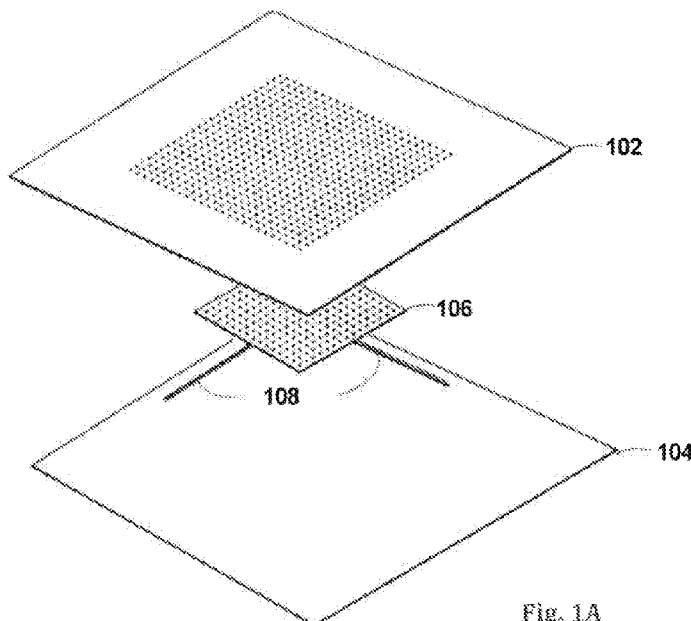


Fig. 1A

(57) Abstract: The systems and methods described here tackle the deficiencies of the prior art by making it possible to produce and use accelerometers, whether based on MEMS, NEMS or CMOS-MEMS, in the same integrated circuit board or block as a CMOS chip. In one embodiment, the accelerometer is produced on the same integrated circuit board or block as a CMOS chip using a typical CMOS production method.

(57) Resumen: Los sistemas y métodos que aquí se describen acometen las deficiencias de la técnica anterior al permitir la fabricación y el uso de acelerómetros, ya estén basados en MEMS, ya estén basados en NEMS, ya se basen en CMOS-MEMS, en el mismo dado o placa de circuito integrado que un chip de CMOS. En una realización, el acelerómetro se fabrica sobre el mismo dado o placa de circuito integrado que un chip de CMOS, utilizando un procedimiento de fabricación de CMOS típico.



WO 2011/157882 A2

SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publicada:

— *sin informe de búsqueda internacional, será publicada nuevamente cuando se reciba dicho informe (Regla 48.2(g))*

ACELERÓMETRO DE RESORTE ELECTROSTÁTICO INESTABLE

Referencia cruzada a Solicitudes relacionadas

5 Esta Solicitud reivindica el beneficio de la Solicitud de Patente Provisional norteamericana de Número de Serie 61/356.272, depositada el 18 de junio de 2010, la cual se incorpora aquí como referencia en su totalidad.

Antecedentes

10 En la actualidad, los dispositivos a escala microscópica y nanoscópica, tales como acelerómetros, se fabrican y empaquetan por separado a partir de un circuito integrado o chip de CMOS al que son conectados. Estos se realizan utilizando procedimientos de fabricación de MEMS [microelectromecánica –“micro-electro-mechanics”] que son
15 incompatibles con los procedimientos típicos de fabricación de CMOS. La conexión del paquete de acelerómetro independiente con un chip de CMOS (por ejemplo, que tiene circuitos de control para hacer funcionar el acelerómetro) da como resultado un dispositivo más grande y proporciona más oportunidades de que se produzcan errores de proceso y la introducción de
20 ruido en el sistema. De acuerdo con ello, existe la necesidad de sistemas y métodos para fabricar un acelerómetro y un chip de CMOS conjuntamente en un dispositivo integrado utilizando un mismo procedimiento de fabricación, tal como un procedimiento de fabricación de CMOS típico.

Sumario

25 Los sistemas y métodos que aquí se describen acometen las deficiencias de la técnica anterior al permitir la fabricación y el uso de acelerómetros, ya estén basados en MEMS, ya estén basados en NEMS [nanoelectromecánica –“nano-electro-mechanics”], ya se basen en CMOS-
30 MEMS, en el mismo dado o placa de circuito integrado que un chip de CMOS [metal-óxido-semiconductor complementario –“Complementary Metal-Oxide-Semiconductor”]. En una realización, el acelerómetro se fabrica sobre el mismo dado o placa de circuito integrado que un chip de CMOS, utilizando un procedimiento de fabricación de CMOS típico.

35 En un aspecto, un acelerómetro incluye un electrodo superior, un

electrodo inferior o de fondo, así como una masa de prueba entre los electrodos superior y de fondo. La masa de prueba está formada integralmente con muelles o resortes que sujetan la masa de prueba en su lugar. En una configuración, se aplica un voltaje o tensión eléctrica al electrodo de fondo con el fin de reducir la constante o módulo elástico efectivo asociado con la masa de prueba. La tensión aplicada genera una fuerza electrostática destinada a contrarrestar el módulo elástico mecánico de los resortes formados integralmente con la masa de prueba. En otra configuración, se aplican tensiones a los electrodos superior y de fondo a fin de descentrar parcial o totalmente las fuerzas mecánicas de los resortes integralmente formados así como las fuerzas electrostáticas generadas. En esta disposición, incluso una pequeña fuerza debida a una aceleración externa es perceptible al ocasionar el movimiento de la masa de prueba. Esto permite al acelerómetro medir con precisión la aceleración en ausencia de otras fuerzas. La fuerza debida a la aceleración externa determina la dirección de la masa de prueba. La fuerza debida a la aceleración externa también influye en el tiempo que le lleva a la masa de prueba alcanzar una posición preestablecida. La medición de este tiempo puede utilizarse para determinar la aceleración externa.

En algunas realizaciones, el acelerómetro emplea una masa de prueba más pequeña y se sirve de metal para ciertos componentes, tales como la masa de prueba o un resorte. Variaciones muy pequeñas de la capacidad son detectadas en la masa de prueba a través de un amplificador cargado, lo que puede compensar una masa de prueba pequeña y la capacidad asociada con la masa de prueba pequeña. El amplificador de carga puede estar integrado monolíticamente con el acelerómetro. Por ejemplo, el amplificador de carga puede estar integrado en un chip que tiene un acelerómetro de MEMS u otros circuitos electrónicos de CMOS.

En algunas realizaciones, el dispositivo de acelerómetro fabricado tiene la capacidad de llevar a cabo una calibración de forma automática con el fin de compensar posibles cambios en las propiedades de los componentes a lo largo del tiempo o para compensar variaciones de proceso durante la fabricación del dispositivo. Se utiliza un circuito y/o procedimiento de autocalibración para calibrar automática y/o periódicamente el acelerómetro. Pueden emplearse diversas técnicas para medir la aceleración y los parámetros asociados, con independencia de la técnica de

fabricación de MEMS o de los tipos de componentes que se utilicen.

En otro aspecto, los sistemas y los métodos que aquí se describen se refieren a un método para hacer funcionar un acelerómetro de MEMS que tiene una masa de prueba. El método incluye aplicar
5 periódicamente un primer voltaje o tensión eléctrica a un primer electrodo situado próximo a la masa de prueba. Esto aplica una fuerza electrostática a la masa de prueba con el fin de arrastrar la masa de prueba hacia una posición preestablecida entre una posición de reposo y el primer electrodo. El método incluye recibir una aceleración externa en el acelerómetro. La aceleración
10 externa puede alterar el tiempo que tarda la masa de prueba en llegar a la posición preestablecida en respuesta a la tensión aplicada. El método incluye determinar que la masa de prueba ha alcanzado la posición preestablecida. El método incluye medir el tiempo que ha tardado la masa de prueba en llegar hasta la posición preestablecida. El método incluye determinar una magnitud y
15 una dirección de la aceleración externa basándose en el tiempo medido.

En algunas realizaciones, determinar que la masa de prueba ha llegado a la posición preestablecida incluye medir un voltaje o tensión correspondiente a una carga almacenada en el primer electrodo y comparar la tensión medida con una tensión predeterminada correspondiente al hecho de
20 que la masa de prueba alcance la posición preestablecida. En algunas realizaciones, medir el tiempo incluye utilizar un circuito de línea o conducción de retardo digital para medir un tiempo comprendido entre un borde la primera tensión periódica y un instante en que la tensión medida iguala la tensión predeterminada. En algunas realizaciones, medir la tensión incluye medir la
25 tensión utilizando un amplificador de carga. En algunas realizaciones, la masa de prueba incluye al menos una capa de metal.

En algunas realizaciones, el método incluye aplicar periódicamente una segunda tensión a un segundo electrodo situado próximo a la masa de prueba. El segundo electrodo puede estar situado en un lado de
30 la masa de prueba opuesto al del primer electrodo. La aplicación de la segunda tensión puede estar sincronizada con la aplicación de la primera tensión periódica del primer electrodo. En algunas realizaciones, la aplicación de la segunda tensión genera una fuerza electrostática en la masa de prueba que descentra completamente la fuerza electrostática generada por la
35 aplicación de la primera tensión periódica. En algunas realizaciones, el método

incluye determinar las magnitudes de las primera y segunda tensiones periódicas tras la fabricación del acelerómetro.

En algunas realizaciones, medir el tiempo incluye medir el tiempo por medio de un circuito de línea de retardo digital. En algunas realizaciones, el tiempo medido oscila entre aproximadamente 1 picosegundo y aproximadamente 100 picosegundos. En algunas realizaciones, la masa de prueba tiene una masa que oscila entre aproximadamente 1 nanogramo y aproximadamente 100 nanogramos. En ciertas realizaciones, el método incluye calibrar automáticamente uno o más parámetros del acelerómetro con el fin de mejorar la precisión de una medición proporcionada por el acelerómetro. En algunas realizaciones, calibrar automáticamente uno o más parámetros del acelerómetro incluye determinar al menos uno de entre una frecuencia de resonancia, una frecuencia de resonancia efectiva y un factor de calidad mecánico del acelerómetro.

En aún otro aspecto, los sistemas y los métodos que aquí se describen se refieren a un método para hacer funcionar un acelerómetro de MEMS que tiene una masa de prueba. El método incluye aplicar periódicamente una primera tensión a un primer electrodo situado próximo a la masa de prueba. Esto aplica una fuerza electrostática a la masa de prueba con el fin de arrastrar la masa de prueba hacia el primer electrodo. El método incluye recibir una aceleración externa en el acelerómetro. La aceleración externa puede alterar el tiempo que le lleva a la masa de prueba alcanzar una velocidad preestablecida en respuesta a la tensión aplicada. El método incluye determinar que la masa de prueba ha alcanzado la velocidad preestablecida. El método incluye medir el tiempo que ha tardado la masa de prueba en alcanzar la velocidad preestablecida. El método incluye determinar una magnitud y una dirección de la aceleración externa basándose en el tiempo medido.

En algunas realizaciones, determinar que la masa de prueba ha alcanzado la velocidad preestablecida incluye medir una tensión correspondiente a una corriente hacia el primer electrodo, y comparar la tensión medida con una tensión predeterminada correspondiente al hecho de que la masa de prueba alcance la velocidad preestablecida. En algunas realizaciones, medir el tiempo incluye utilizar un circuito de línea o conducción de retardo digital para medir un tiempo entre un borde de la primera tensión

periódica y un instante en que la tensión medida iguala la tensión predeterminada. En ciertas realizaciones, medir la tensión comprende medir la tensión utilizando una corriente hacia el convertidor de tensión.

En algunas realizaciones, el método incluye aplicar
5 periódicamente una segunda tensión a un segundo electrodo situado próximo a la masa de prueba. El segundo electrodo puede estar situado en un lado de la masa de prueba opuesto al del primer electrodo. La aplicación de la segunda tensión puede estar sincronizada con la aplicación de la primera tensión periódica al primer electrodo. En algunas realizaciones, la aplicación
10 de la segunda tensión genera una fuerza electrostática en la masa de prueba que descentra por completo la fuerza electrostática generada por la aplicación de la primera tensión periódica. En algunas realizaciones, el método incluye determinar las magnitudes de las primera y segunda tensiones periódicas tras la fabricación del acelerómetro.

En algunas realizaciones, medir el tiempo incluye medir el tiempo
15 por medio de un circuito de línea o conducción de retardo digital. En algunas realizaciones, el tiempo medido oscila entre aproximadamente 1 picosegundo y aproximadamente 100 picosegundos. En ciertas realizaciones, la masa de prueba tiene una masa que oscila entre aproximadamente 1 nanogramo y
20 aproximadamente 100 nanogramos. En algunas realizaciones, el método incluye calibrar automáticamente uno o más parámetros del acelerómetro con el fin de mejorar la precisión de una medición proporcionada por el acelerómetro. En algunas realizaciones, calibrar automáticamente uno o más parámetros del acelerómetro incluye determinar al menos uno de entre una
25 frecuencia de resonancia, una frecuencia de resonancia efectiva y un factor de calidad mecánico del acelerómetro.

En aún otro aspecto, los sistemas y los métodos que se describen aquí se refieren a un aparato para analizar la aceleración de una masa de prueba de un acelerómetro de MEMS que tiene una masa de prueba.
30 El aparato incluye una primera fuente de voltaje o tensión para aplicar periódicamente una primera tensión a un primer electrodo situado próximo a la masa de prueba. Esto aplica una fuerza electrostática a la masa de prueba con el fin de arrastrar la masa de prueba hacia el primer electrodo. El aparato incluye un primer comparador para comparar una tensión correspondiente a la
35 velocidad de la masa de prueba, con una tensión predeterminada, a fin de

determinar que la masa de prueba ha alcanzado la velocidad preestablecida. El aparato incluye un circuito de línea o conducción de retardo digital para medir el tiempo que le lleva a la masa de prueba alcanzar la velocidad preestablecida. El aparato incluye un procesador para determinar una magnitud y una dirección de una aceleración externa aplicada al acelerómetro, basándose en el tiempo medido.

En aún otro aspecto, los sistemas y los métodos que aquí se describen se refieren a un aparato para analizar la aceleración de una masa de prueba de un acelerómetro de MEMS que tiene una masa de prueba. El aparato incluye una primera fuente de voltaje o tensión, destinada a aplicar periódicamente una primera tensión a un primer electrodo situado próximo a la masa de prueba. Esto aplica una fuerza electrostática a la masa de prueba con el fin de arrastrar la masa de prueba hacia el primer electrodo. El aparato incluye un primer comparador para comparar una tensión correspondiente a la posición de la masa de prueba con una tensión predeterminada, a fin de determinar que la masa de prueba ha llegado a una posición preestablecida. El aparato incluye un circuito de línea o conducción de retardo digital para medir el tiempo que le lleva a la masa de prueba alcanzar la posición preestablecida. El aparato incluye un procesador para determinar una magnitud y una dirección de una aceleración externa aplicada al acelerómetro basándose en el tiempo medido.

En aún otro aspecto, los sistemas y los métodos que aquí se describen se refieren a un método para hacer funcionar un acelerómetro de MEMS que tiene una masa de prueba. El método incluye aplicar una primera tensión periódica a un primer electrodo situado próximo a la masa de prueba. Esto aplica una fuerza electrostática que induce una vibración en la masa de prueba a una primera frecuencia de resonancia y, subsiguientemente, desplaza la masa de prueba en un primer desplazamiento. El método incluye aplicar una segunda tensión al primer electrodo situado próximo a la masa de prueba. Esto aplica una fuerza electrostática que induce la vibración de la masa de prueba a una segunda frecuencia de resonancia y, subsiguientemente, desplaza la masa de prueba en un segundo desplazamiento. El método incluye aplicar una tercera tensión al primer electrodo situado próximo a la masa de prueba. Esto aplica una fuerza electrostática que induce la vibración de la masa de prueba a una tercera

frecuencia de resonancia y, subsiguientemente, desplaza la masa de prueba en un tercer desplazamiento. La tercera tensión periódica es un múltiplo de la segunda tensión periódica. El método incluye determinar un descentramiento relativo a una posición de reposo para la masa de prueba, basándose en las tensiones periódicas aplicadas, en las frecuencias de resonancia y en los desplazamientos.

En algunas realizaciones, el método incluye aplicar la primera tensión al primer electrodo situado próximo a la masa de prueba. El método incluye recibir una aceleración externa en el acelerómetro. La aceleración externa puede alterar el desplazamiento de la masa de prueba hasta un nuevo desplazamiento. El método incluye determinar el nuevo desplazamiento de la masa de prueba, y determinar una magnitud de la aceleración externa basándose en la primera frecuencia de resonancia, el descentramiento determinado y el nuevo desplazamiento.

15

Breve descripción de los dibujos

Otras ventajas y características de los sistemas y métodos que se describen aquí pueden apreciarse por la siguiente descripción, la cual proporciona una descripción no limitativa de realizaciones ilustrativas, con referencia a los dibujos que se acompañan, en los cuales:

La Figura 1A representa una vista en perspectiva de un acelerómetro de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 1B ilustra un corte transversal de un acelerómetro de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 2 representa una vista en perspectiva de una masa de prueba adecuada para ser utilizada en el acelerómetro de las Figuras 1A y 1B, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 3A ilustra un corte transversal de un acelerómetro conjuntamente con un diagrama de circuito correspondiente para medir la aceleración, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 3B ilustra un corte transversal de un acelerómetro conjuntamente con un diagrama de circuito correspondiente para medir la aceleración, de acuerdo con otra realización ilustrativa de la invención;

La Figura 3C ilustra un corte transversal de un acelerómetro conjuntamente con un diagrama de circuito correspondiente para medir la

aceleración, de acuerdo con aún otra realización ilustrativa de la invención;

La Figura 4 ilustra un diagrama de flujo para hacer funcionar un acelerómetro, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 5A representa un corte transversal tras un primer conjunto de etapas de flujo de procedimiento para fabricar un acelerómetro, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 5B ilustra un corte transversal tras un segundo conjunto de etapas de flujo de procedimiento para la fabricación de un acelerómetro, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 5C representa un corte transversal tras un tercer conjunto de etapas de flujo de procedimiento para la fabricación de un acelerómetro, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 6 ilustra un corte transversal de un acelerómetro que tiene una realización alternativa de una masa de prueba, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 7A ilustra un corte transversal de un acelerómetro que tiene su masa de prueba en una posición de reposo, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 7B ilustra un corte transversal de un acelerómetro que tiene su masa de prueba en una primera posición preestablecida, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención;

La Figura 7C representa un corte transversal de un acelerómetro que tiene su masa de prueba en una segunda posición preestablecida, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención.

Descripción detallada de realizaciones

Con el fin de proporcionar una comprensión global de los sistemas y los métodos que aquí se describen, se describirán a continuación ciertas realizaciones ilustrativas. Sin embargo, se comprenderá por una persona con conocimientos ordinarios de la técnica que los sistemas y los métodos que aquí se describen pueden ser adaptados y modificados según sea apropiado para la aplicación de que se trate, y que los sistemas y los métodos aquí descritos pueden emplearse en otras aplicaciones adecuadas, y que dichas otras adiciones y modificaciones no se apartarán del ámbito de la misma.

Las Figuras 1A y 1B ilustran, respectivamente, una vista en perspectiva y un corte transversal de un acelerómetro 100, de acuerdo con realizaciones ilustrativas de la invención. El acelerómetro 100 incluye un electrodo superior 102, una masa de prueba 106 bajo el electrodo superior, y un electrodo inferior o de fondo 104 bajo la masa de prueba. La masa de prueba 106 está suspendida por debajo del electrodo superior 102 y por encima del electrodo de fondo 104. En una realización, la distancia entre la masa de prueba 106 y uno de los electrodos 102 o 104 oscila entre aproximadamente $0,3\ \mu\text{m}$ y aproximadamente $0,7\ \mu\text{m}$. La masa de prueba 106 incluye tres placas de metal movibles 110, formadas integralmente con unos muelles o resortes 108. Las placas movibles 110 están hechas de capas de metal apiladas y se unen entre sí por medio de unos separadores metálicos o tirantes 112. En una realización, las capas de metal están compuestas de material utilizado en un procedimiento de CMOS convencional, por ejemplo, una aleación de AlCu. En una realización, las placas movibles 110 tienen diámetros de aproximadamente $60\ \mu\text{m}$. En otras realizaciones, las placas móviles tienen diámetros que oscilan entre aproximadamente $50\ \mu\text{m}$ y aproximadamente $100\ \mu\text{m}$. Los resortes 108 restringen el movimiento de la masa de prueba 106 en una o más direcciones, al tiempo que permiten, sin embargo, el movimiento de la masa de prueba 106 en otra dirección. Por ejemplo, los resortes 108 pueden restringir el movimiento de la masa de prueba 106 en las direcciones x e y y permitir el movimiento de la masa de prueba en la dirección z . El acelerómetro 100 incluye, adicionalmente, un procesador para hacer funcionar el acelerómetro. El procesador controla una o más fuentes de voltaje o tensión que aplican una tensión en uno de los electrodos 102 y 104 o en ambos con el fin de inducir fuerzas electrostáticas en la masa de prueba 106, determina una dirección y una magnitud de una aceleración externa, y lleva a cabo otras funciones adecuadas para hacer funcionar el acelerómetro, incluyendo el control de un procedimiento de autocalibración. En una realización, el acelerómetro 100 se fabrica en una cavidad formada dentro de las capas de interconexión de un chip de CMOS. Las paredes de la cavidad se hacen de óxido, y se forma un extremo de los resortes 108 integralmente con las placas movibles 110 de la masa de prueba 106, al tiempo que el extremo se empotra o embute en el óxido para proporcionar soporte a la masa de prueba 106. Dicho acelerómetro puede

fabricarse utilizando el procedimiento nanoEMSTM que se describe en la Publicación de Solicitud de Patente norteamericana, del mismo titular que la presente, N° 2010/0295138, titulada "Métodos y Sistemas para la Fabricación de dispositivos de MEMS CMOS" y que se incorpora aquí como referencia en su integridad.

La Figura 2 ilustra una vista en perspectiva de una masa de prueba 200 adecuada para ser utilizada en el acelerómetro de las Figuras 1A y 1B, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención. La masa de prueba 200 es similar a la masa de prueba 106 descrita con referencia a las Figuras 1A y 1B. La masa de prueba 200 incluye tres placas de metal móviles 110 integralmente formadas con los resortes 108. Las placas móviles 110 tienen unos orificios pasantes 202 para reducir la presión del aire que, de otro modo, obstaculizaría su movimiento. Los orificios pasantes 202 pueden permitir el paso de agente de ataque químico superficial durante la fabricación, por ejemplo, HF en vapor, para someter a ataque químico superficial el material situado por debajo de las placas móviles 110. Los orificios pasantes 202 pueden utilizarse también para colocar otras características o formaciones mecánicas tales como separadores. Los resortes 108 hacen posible el movimiento fuera de plano de las placas móviles 110 (por ejemplo, en el eje z), en tanto que el movimiento en otras direcciones (por ejemplo, en los ejes x e y) se ve restringido como consecuencia de la rigidez de los resortes 108. Los resortes 108 pueden haberse formado de manera que tengan estructuras más complejas, por ejemplo, una forma de serpentina, una forma de S, una forma en zigzag o cualquier otra forma de resorte adecuada. En una realización, la masa de prueba 200 incluye una placa móvil y resortes hechos de una capa de metal compuesta de material utilizado en el procedimiento de CMOS convencional.

La Figura 3A ilustra un corte transversal de un acelerómetro según se ha ilustrado en las Figuras 1a y 1B, conjuntamente con un diagrama de circuito correspondiente para medir la aceleración, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención. El acelerómetro incluye un electrodo superior 302 y un electrodo inferior o de fondo 304 que tienen una masa de prueba 306 dispuesta entre medias. La masa de prueba 306 es similar a la masa de prueba 106 que se ha descrito con referencia a las Figuras 1A y 1B. El electrodo superior 302 y la masa de prueba 306 están conectados a tierra.

El electrodo de fondo 304 está conectado a una fuente de tensión 308. El electrodo de fondo 304 está también conectado a un amplificador de carga 310 que tiene un amplificador operacional 311 y un condensador 312. El amplificador de carga es un convertidor de carga en tensión y suministra como salida una tensión proporcional a la capacidad entre el electrodo de fondo 304 y la masa de prueba 306. La tensión de salida 322 del amplificador de carga se conecta a un comparador 314 que compara la tensión de salida 322 con la tensión de referencia 316. La salida 324 del comparador 314 se suministra a un circuito 318 de línea de retardo digital o bucle acoplado en retardo (DLL – “delay-locked loop”). El circuito de DLL 318 está también conectado a una fuente de tensión 308, la cual está conectada al electrodo de fondo 304. El circuito de DLL 318 está en comunicación con el procesador 320. El procesador 320 contiene lógica para calcular una dirección y una magnitud de la aceleración externa recibida en el acelerómetro. En una realización, el procesador 320 consiste en, o incluye, un Circuito Integrado Específico de la Aplicación (ASIC – “Application-Specific Integrated Circuit”), una Matriz de Puerta Programable en Campo (FPGA – “Field Programmable Gate Array”), un Procesador de Señal Digital (DPS – “Digital Signal Processor”), o lógica digital adecuada. En una realización, el procesador 320 incluye una memoria que tiene uno o más elementos de entre un registro, una Memoria de Acceso Aleatorio (RAM – “Random Access Memory”), una Memoria de Solo Lectura (ROM – “Read-Only Memory”), una Memoria de Solo Lectura Programable (PROM – “Programmable Read-Only Memory”), o una memoria de tipo *flash* o de refrescamiento por impulsos. En la divulgación de Michalik et al., 2010: “*Technology-portable mixed-signal sensing architecture for CMOS-integrated z-axis surface-micromachined accelerometers*” (“Arquitectura de detección de señal mezclada incorporable a la tecnología, para acelerómetros micromecanizados superficialmente en el eje z, integrados en CMOS”), Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES – Diseño mezclado de circuitos y sistemas integrados), 2010, Proceedings of the 17th International Conference (Procedimientos de la 17ª Conferencia Internacional), 2010: 431-435, cuyo contenido se incorpora aquí como referencia en su totalidad, se describe una realización de un circuito de DLL 318 adecuado.

Durante el funcionamiento del acelerómetro, una tensión periódica, por ejemplo, una tensión de onda cuadrada, se suministra por parte

de la fuente de tensión 308 al electrodo de fondo 304 y al circuito de DLL 318. En una realización, la tensión es igual o mayor que una tensión conectora o de cierre del acelerómetro, y oscila en la amplitud de los intervalos de tensión periódica de entre aproximadamente 2 V y aproximadamente 24 V. En una
5 realización, la frecuencia de la tensión periódica es menor que una frecuencia de resonancia del acelerómetro y oscila entre 10 kHz y 100 kHz. La tensión suministrada crea un campo eléctrico y una fuerza electromotriz asociada a través del electrodo de fondo 304 y la masa de prueba 306, que arrastra la masa de prueba 306 hacia el electrodo de fondo 304. La tensión suministrada
10 también inicia el circuito de DLL 318 para comenzar a medir un periodo de tiempo. El circuito de DLL 318 puede ser inicializado en un borde de subida o en un borde bajada de la tensión periódica suministrada. El amplificador de carga 310 suministra como salida una tensión 322 proporcional a la capacidad variable que resulta del movimiento de la masa de prueba 306 hacia el
15 electrodo de fondo 304. El comparador 314 compara la tensión de salida 322 con la tensión de referencia 316 y genera una salida 324 hacia el circuito de DLL 318. La salida 324 es una tensión alta si la tensión de salida 322 es mayor que la tensión de referencia 316. La salida 324 es una tensión baja si la salida 322 es menor que la tensión de referencia 316. Por ejemplo, la salida
20 324 es una tensión positiva si la tensión de salida 322 es mayor que la tensión de referencia 316, y es una tensión negativa si la salida 322 es menor que la tensión de referencia 316. Cuando el circuito de DLL 318 recibe una tensión alta para la salida 324, es decir, una tensión de salida 322 mayor que la tensión de referencia 316, el circuito de DLL 318 finaliza la medición del
25 periodo de tiempo y remite la medición al procesador 320. El procesador 320 calcula experimentada por el acelerómetro basándose en la medición del tiempo. La tensión periódica suministrada por la fuente de tensión 308 provoca el movimiento de la masa de prueba 306 (por ejemplo, en un borde de subida), y permite que la masa de prueba 306 retorne a su posición de reposo (por
30 ejemplo, en un borde caída). La inversión de la tensión aplicada al electrodo de fondo 304 periódicamente ayuda a evitar que se acumule un exceso de carga en el electrodo y contribuye a mantener la precisión de la medición y la fiabilidad del acelerómetro.

La tensión de referencia 316 corresponde a una posición
35 preestablecida para la masa de prueba 306. Esta calibración se lleva a cabo

durante la fabricación del acelerómetro. Alternativamente, la calibración puede efectuarse automáticamente durante el funcionamiento del acelerómetro, de lo que se proporcionan detalles más adelante en la descripción. Cuando el comparador 314 determina que la tensión de salida 322 es mayor que la tensión de referencia 316, es que la masa de prueba 306 ha sobrepasado la posición preestablecida. El desplazamiento de la masa de prueba 306 hasta alcanzar la posición preestablecida se recupera desde la memoria del procesador 320. En una realización, la posición preestablecida se encuentra en torno al 10% de la distancia entre la masa de prueba 306 y el electrodo de fondo 304, desde la posición de reposo de la masa de prueba 306. En una realización, la posición preestablecida oscila entre aproximadamente 50 nm y aproximadamente 200 nm desde la posición de reposo de la masa de prueba 306. El procesador 320 también recibe del circuito de DLL 318 una medición del tiempo que le lleva a la masa de prueba 306 llegar a la posición preestablecida. El procesador 320 calcula una magnitud de aceleración experimentada por el acelerómetro basándose en el desplazamiento y en la medición del tiempo de acuerdo con lo siguiente:

$$a = 2 * x / t^2$$

20

donde x es el desplazamiento, y

t es la medición del tiempo.

Por otra parte, el procesador 320 calcula una dirección de la aceleración. Suponiendo que no hay aceleración externa, a la masa de prueba 306 le lleva un cierto periodo de tiempo llegar a la posición preestablecida. Este periodo de tiempo puede denominarse periodo de tiempo de umbral. Si la medición del tiempo proporcionada por el circuito de DLL 318 es mayor que el periodo de tiempo de umbral, entonces la dirección de la aceleración es en alejamiento del electrodo superior y hacia el electrodo de fondo. Alternativamente, si la medición del tiempo es menor que el periodo de tiempo de umbral, entonces la dirección de la aceleración es en alejamiento del electrodo de fondo y hacia el electrodo superior.

En una realización, el procesador 320 determina la aceleración experimentada por el acelerómetro basándose en la medición de tiempo, mediante la recuperación del valor de aceleración correspondiente a la

35

medición del tiempo desde una tabla de consulta. Detalles adicionales de este realización se describen más adelante en la descripción, con respecto a un procedimiento de calibración.

En una realización, el procesador 320 calcula el desplazamiento de la masa de prueba 306 basándose en la capacidad resultante del movimiento de la masa de prueba 306. El amplificador de carga 310 suministra como salida la tensión 322 proporcional a la capacidad variable que resulta del movimiento de la masa de prueba 306 hacia el electrodo de fondo 304. El procesador 320 calcula el factor de proporcionalidad $\left(\frac{C_0}{g}\right)$, el cual se describe más adelante en la descripción. El desplazamiento de la masa de prueba 306 y la capacidad variable están entonces relacionados de acuerdo con lo siguiente:

$$C \approx C_0 + \left(\frac{C_0}{g}\right)x$$

15

Una vez que se conoce la relación existente entre la capacidad variable y el desplazamiento, puede determinarse la capacidad correspondiente a un desplazamiento. Por ejemplo, se determina la capacidad correspondiente al desplazamiento para la posición preestablecida. La tensión de referencia 316 correspondiente a la posición preestablecida se ajusta basándose en la capacidad correspondiente.

En una realización alternativa, la tensión de referencia 316 corresponde a una velocidad preestablecida para la masa de prueba 306. En lugar del amplificador de carga 310, se ha proporcionado un amplificador de corriente. El amplificador de corriente incluye un amplificador operacional 311, conectado a una resistencia (en lugar del condensador 312) en una configuración similar. El amplificador de corriente es un convertidor de corriente en tensión y suministra como salida una tensión 322 proporcional a la corriente detectada en el electrodo de fondo 304. Cuando el comparador 314 determina que la tensión de salida 322 es mayor que la tensión de referencia 316, es que la masa de prueba 306 ha sobrepasado la velocidad preestablecida. La medición del tiempo para que la masa de prueba 306 alcance la velocidad preestablecida se proporciona al procesador 320 por

medio del circuito de DLL 318. De esta forma, el procesador 320 calcula la aceleración experimentada por el acelerómetro basándose en la velocidad preestablecida y en la medición del tiempo, de acuerdo con la siguiente expresión:

5

$$a = v / t$$

donde v es la velocidad, y

t es la medición del tiempo.

En una realización, el procesador 320 calcula la velocidad de la masa de prueba 306 basándose en la corriente detectada en el electrodo de fondo 304. El amplificador de corriente suministra como salida una tensión 322 proporcional a la corriente i_C detectada en el electrodo de fondo 304, la cual es proporcional a la velocidad de la masa de prueba 306, \dot{x} , según se describe en lo que sigue:

15

$$(14) \quad i_C = V_p \frac{dC}{dt} \approx V_p \left(\frac{C_0}{g} \right) \dot{x}$$

donde V_p es la tensión aplicada al electrodo de fondo 304,

C_0 es la capacidad entre la masa de prueba 306 y el electrodo de fondo 304, y

20 g es la distancia entre la masa de prueba 306 y el electrodo de fondo 304.

A fin de determinar la velocidad \dot{x} de la masa de prueba 306, el procesador

302 calcula la constante de proporcionalidad $\left(\frac{C_0}{g} \right)$. En una realización, el

procesador 302 controla una fuente de tensión para aplicar una corriente a través del electrodo de fondo 304 con el fin de generar un campo magnético

25 local \vec{B}_{cal} ortogonal a la dirección del movimiento de la masa de prueba 306, y

recibe una medición de la tensión v_L generada a través de la masa de prueba

306 en una dirección ortogonal tanto al campo magnético como a la dirección

del movimiento. Utilizando la ecuación de la fuerza de Lorentz, la velocidad \dot{x}

para la masa de prueba 306 se calcula a la partir de:

30

$$(15) \quad v_L = (B_{cal} \cdot l) \dot{x}$$

donde l es la longitud de la masa de prueba 306 y $(B_{cal} \cdot l)$ es un parámetro de diseño. Se espera que la variación relativa del valor $(B_{cal} \cdot l)$ debida a las tolerancias de procedimiento y a las variaciones de temperatura sea pequeña y, por tanto, pueda ser considerada aproximadamente constante para el funcionamiento del acelerómetro.

Dada la velocidad \dot{x} para la masa de prueba 306, el factor de proporcionalidad $\left(\frac{C_0}{g}\right)$ puede calcularse utilizando la ecuación (14). El campo magnético local \vec{B}_{cal} puede ser activado o conectado periódicamente con el fin de calcular el factor de proporcionalidad, y, seguidamente, desactivado. El factor de proporcionalidad se utiliza entonces para calcular la velocidad \dot{x} para la masa de prueba 306. La corriente de umbral $i_{C_{max}}$ que es necesario detectar por parte del amplificador de corriente puede ser calculada basándose en el factor de proporcionalidad. En una realización, la corriente de umbral $i_{C_{max}}$ se mantiene constante mientras el procesador 302 calcula la variable $\left(\frac{C_0}{g}\right)$ con el fin de determinar la velocidad \dot{x} para la masa de prueba 306 y, en consecuencia, la aceleración experimentada por la masa de prueba 306.

La Figura 3B es una realización alternativa de un acelerómetro y sus circuitos correspondientes, que incluyen el circuito de DLL 318 con una resolución más baja. En dicha realización, en ausencia de cualquier amortiguación, el tiempo que le lleva a la masa de prueba 306 desplazarse hasta la posición preestablecida puede ser más pequeño que la resolución del circuito de DLL 318. Para resolver este problema, el movimiento de la masa de prueba 306 es amortiguado mediante la conexión del electrodo superior 302 a una fuente de tensión, en lugar de a tierra. Esta solución resulta beneficiosa para un acelerómetro que tenga una masa de prueba pequeña, por ejemplo, que oscile desde en torno a 0,1 nanogramos hasta aproximadamente 100 nanogramos, pero sin limitarse a estos valores. Similarmente a la Figura 3A, el acelerómetro incluye el electrodo superior 302 y el electrodo inferior o de fondo 304, y tiene una masa de prueba 306 dispuesta entre ambos. Sin embargo, el electrodo superior 302 está conectado a una fuente de tensión 326. Las restantes conexiones están configuradas similarmente a la Figura 3A.

La masa de prueba 306 está conectada a tierra. El electrodo de fondo 304 está conectado a la fuente de tensión 308. El electrodo de fondo 304 está también conectado a al amplificador de carga 310, el cual tiene un amplificador operacional 311 y un condensador 312. La tensión de salida 322 del amplificador de carga está conectada a un comparador 314 que compara la tensión de salida 322 con la tensión de referencia 316. La salida 324 del comparador 314 es suministrada a un circuito 318 de bucle bloqueado en retardo (DLL –“delay-locked loop”). El circuito de DLL 318 está también conectado a la fuente de tensión 308, la cual está conectada al electrodo de fondo 304. El circuito de DLL 318 se encuentra en comunicación con el procesador 320.

Durante el funcionamiento del acelerómetro, una tensión periódica, por ejemplo, una tensión de onda cuadrada, es suministrada por parte de la fuente de tensión 308 al electrodo de fondo 304 y al circuito de DLL 318. Otra tensión periódica, sincronizada con la fuente de tensión 318, es suministrada por la fuente de tensión 326. Sin embargo, la fuente de tensión 326 suministra una tensión que tiene una magnitud diferente de la de la fuente de tensión 318. Las tensiones suministradas crean respectivos campos eléctricos y fuerzas electromotrices asociadas a través del electrodo de fondo 304 y de la masa de prueba 306, y a través del electrodo superior 302 y de la masa de prueba 306, respectivamente. La tensión suministrada desde la fuente de tensión 318 también inicia el circuito de DLL 318 para comenzar a medir un periodo de tiempo. La resolución o sensibilidad requerida para el circuito de DLL 318 se ve reducida (comparada con la del circuito de DLL representado en la Figura 3A) debido a que la tensión suministrada al electrodo superior 302 amortigua el movimiento de la masa de prueba 306. En un ejemplo no limitativo, el circuito de DLL 318 puede tener una resolución temporal que oscila entre aproximadamente 10 ns y aproximadamente 100 ns, en tanto que el circuito de DLL de la Figura 3A puede tener una resolución temporal que oscila entre aproximadamente 10 ps y aproximadamente 100 ps. El amplificador de carga 310 suministra como salida una tensión 322 proporcional a la capacidad variable resultante del movimiento de la masa de prueba 306 con respecto al electrodo de fondo 304. El comparador 314 compara la tensión de salida 322 con la tensión de referencia 316 y genera la salida 324 para el circuito de DLL 318. La salida 324 es una tensión alta si la

tensión de salida 322 es mayor que la tensión de referencia 316. La salida 324 es una tensión baja en el caso de que la salida 322 sea menor que la tensión de referencia 316. Cuando el circuito de DLL 318 recibe una tensión alta para la salida 324, es decir, una tensión de salida 322 mayor que la tensión de referencia 316, el circuito de DLL 318 finaliza la medición del periodo de tiempo y remite la medición al procesador 320. La medición del tiempo que lleva a la masa de prueba 306 llegar a la posición preestablecida, es proporcionada al procesador 320 por parte del circuito de DLL 318, y el procesador 320 calcula la aceleración experimentada por el acelerómetro basándose en la posición preestablecida y en la medición del tiempo.

La Figura 3C es una realización alternativa de un acelerómetro y sus circuitos correspondientes, en la que las tensiones periódicas suministradas por la fuente de tensión 308 y la fuente de tensión 326 están sincronizadas y tienen magnitudes tales, que sus respectivos efectos en la masa de prueba 306 están completamente descentrados. Esto puede denominarse suavización electrostática. La masa de prueba 306 se encuentra situada en un equilibrio inestable. En tal caso, la masa de prueba 306 se desplaza fundamentalmente debido a una aceleración externa, en tanto que existe un movimiento mínimo de la masa de prueba 306 debido a las tensiones suministradas. Similarmente a la Figura 3A, la tensión suministrada desde la fuente de tensión 308 inicia o activa el circuito de DLL 318 para que inicie la medición de un periodo de tiempo. Sin embargo, el amplificador de carga 310 proporciona la tensión de salida 322 a los comparadores 314 y 328 para determinar si la masa de prueba 306 ha alcanzado una primera o una segunda posiciones preestablecidas. La primera posición preestablecida corresponde a una aceleración de la masa de prueba 306 tal, que esta se desplaza hacia el electrodo de fondo 306. La primera posición preestablecida corresponde a la tensión de referencia 316. La segunda posición preestablecida corresponde a una aceleración de la masa de prueba 306 tal, que esta se desplaza hacia el electrodo superior 302. Esta segunda posición preestablecida corresponde a la tensión de referencia 330. El circuito de DLL 318 recibe respectivas salidas 324 y 332 de los comparadores 314 y 328, y pone fin a la medición del periodo de tiempo cuando la tensión de salida 322, bien es mayor que la tensión de referencia 316 o bien es menor que la tensión de referencia 330. El circuito de DLL 318 proporciona al procesador 320 la medición del tiempo que le lleva a la

masa de prueba 306 llegar a la posición preestablecida respectiva. El procesador 320 recibe las salidas 324 y 332 de los comparadores 314 y 328 y determina si la masa de prueba 306 ha alcanzado la primera o la segunda posiciones preestablecidas. El desplazamiento de la masa de prueba 306 para alcanzar la posición respectiva es recuperado desde la memoria del procesador 320. El procesador 320 calcula la aceleración experimentada por el acelerómetro basándose en la posición preestablecida respectiva y en la medición del tiempo. En una realización alternativa, una porción de los circuitos de medición se ha replicado o reproducido de manera tal, que un segundo amplificador de carga, el comparador 328 y la tensión de referencia 330 están conectados al electrodo superior 302. El amplificador de carga 310 únicamente necesita proporcionar una tensión de salida 322 al comparador 314 para determinar si la masa de prueba 306 ha alcanzado la primera posición preestablecida, en tanto que el segundo amplificador de carga proporciona una tensión de salida al comparador 328 con el fin de determinar si la masa de prueba 306 ha alcanzado la segunda posición preestablecida. Sin embargo, la reproducción de los circuitos de medición se puede sumar al coste y al área del dado o placa para la fabricación del acelerómetro, así como incrementar el consumo de potencia del acelerómetro.

Para resumir el funcionamiento de un acelerómetro según se describe con referencia a las Figuras 3A-3C, la Figura 4 representa un diagrama de flujo para hacer funcionar un acelerómetro, de acuerdo con una realización ilustrativa. En la etapa 402, los circuitos de control de un acelerómetro aplican una tensión periódica, por ejemplo, una tensión de onda cuadrada, a un electrodo inferior o de fondo del acelerómetro y a un circuito de bucle bloqueado en retardo (DLL), en comunicación con el acelerómetro. La tensión suministrada crea un campo eléctrico y una fuerza electromotriz asociada a través del electrodo de fondo y la masa de prueba, que arrastra la masa de prueba hacia el electrodo de fondo. La tensión suministrada también inicia el circuito de DLL para que se comience a medir un periodo de tiempo. En una realización alternativa, se aplican tensiones periódicas que están sincronizadas y que tienen diferentes magnitudes, a los electrodos superior y de fondo del acelerómetro. En otra realización, se aplican tensiones periódicas que están sincronizadas y que tienen magnitudes tales, que sus respectivos efectos en la masa de prueba están completamente descentrados, a los

electrodos superior y de fondo de la masa del acelerómetro. Más adelante se proporcionan detalles adicionales que describen el modo como determinar tales tensiones cuyos efectos respectivos en la masa de prueba están completamente descentrados.

5 En la etapa 404, los circuitos de control del acelerómetro determinan cuándo la masa de prueba ha llegado a la posición preestablecida. Con la ayuda de un amplificador de carga, los circuitos de control suministran como salida una tensión proporcional a la carga variable que resulta del movimiento de la masa de prueba hacia el electrodo de fondo. Los circuitos de control comparan, entonces, la tensión con una tensión de referencia, la cual
10 indica que la masa de prueba ha llegado a la posición preestablecida. Cuando los circuitos de control reciben una indicación de que la masa de prueba ha llegado a la posición preestablecida, los circuitos de control ponen fin a la medición del periodo de tiempo por parte del circuito de DLL y remiten la
15 medición a un procesador. El desplazamiento de la masa de prueba hasta alcanzar la posición preestablecida es recuperado de la memoria del procesador. Alternativamente, los circuitos de control determinan si la masa de prueba ha alcanzado una velocidad preestablecida con la ayuda de un amplificador de corriente, y remiten al procesador una medición del tiempo que
20 le lleva a la masa de prueba alcanzar la velocidad preestablecida.

 En la etapa 406, el procesador calcula la aceleración experimentada por el acelerómetro basándose en el desplazamiento y en la medición del tiempo. Alternativamente, el procesador recibe una velocidad y una medición del tiempo y calcula la aceleración experimentada por el
25 acelerómetro basándose en la velocidad y en la medición del tiempo.

 Se describirán a continuación las etapas de flujo de procedimiento para fabricar un acelerómetro que se hace funcionar según se ha descrito con respecto a la Figura 4. La Figura 5A ilustra un corte transversal tras un primer conjunto de etapas de flujo de procedimiento para la
30 fabricación de un acelerómetro, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención. El espesor de las capas ha sido aumentado. En una realización, el acelerómetro se fabrica utilizando un procedimiento de CMOS convencional. En una realización, el acelerómetro se fabrica en el interior de una cavidad formada dentro de las capas de interconexión o unión mutua de un chip de
35 CMOS. En una realización alternativa, el acelerómetro se fabrica como un

dispositivo de MEMS autónomo. En primer lugar, se deposita una capa de metal para el electrodo de fondo 502. La capa metálica puede estar hecha, por ejemplo, de una aleación metálica de AlCu. Por encima del electrodo de fondo 502 se deposita una capa Dieléctrica con Metal Intermedio (IMD –“Inter Metal Dielectric”) 504. En una realización, la capa de IMD incluye una capa de óxido sin adulterar o dopar. Por encima de la capa de IMD 504 se deposita una capa de metal 506 para la masa de prueba. Una capa de enmascaramiento se deposita sobre la capa de metal 506, y, a continuación, la capa de metal 506 se somete a un ataque químico superficial utilizando, por ejemplo, HF seco, a fin de formar una placa movable 506a y unos muelles o resortes 506b. Se deposita otra capa de IMD 510 sobre la capa de metal 506, seguida de una capa de enmascaramiento, y, a continuación, la capa de IMD se somete a un ataque químico superficial y se llena con metal a fin de formar unos separadores o tirantes 508. El procedimiento llevado a cabo en la capa de metal 506 se repite para las capas de metal 512 y 518, a fin de formar más placas movibles integralmente conformadas con muelles o resortes para la masa de prueba. El procedimiento llevado a cabo en la capa de IMD 510 se repite para la capa de IMD 516 a fin de formar unos tirantes 514. En la realización que se muestra, la masa de prueba incluye tres placas movibles conjuntamente con resortes integralmente formados. Se deposita otra capa de IMD 520 sobre la capa metálica 518, seguida de una capa metálica 522 para el electrodo superior. Una capa de enmascaramiento se deposita sobre la capa de metal 522. La capa de metal 522 se somete entonces a un ataque químico superficial para formar los orificios pasantes 524. Los orificios pasantes pueden también permitir el paso de un agente de ataque químico superficial, por ejemplo, HF en vapor, para un ataque químico superficial del material situado por debajo de la capa metálica 522.

Las Figuras 5B y 5C ilustran cortes transversales tras un segundo y un tercer conjuntos de etapas de flujo de procedimiento, respectivamente, para la fabricación del acelerómetro, de acuerdo con realizaciones ilustrativas de la invención. Un agente de ataque químico superficial, por ejemplo, HF seco, es liberado a través de los orificios pasantes 524 situados en el electrodo superior 522. El agente de ataque químico superficial ataca y elimina superficialmente ciertas porciones de las capas de IMD 504, 510, 516 y 520 con el fin de liberar las placas movibles y los resortes para la masa de prueba,

tal y como se muestra en la Figura 5B. Uno de los extremos de los resortes se extiende desde las placas móviles de la masa de prueba, en tanto que el otro extremo está empotrado o embutido en el óxido restante de las capas de IMD 504, 510, 516 y 520 que quedan para formar las paredes de la cavidad, a fin de proporcionar soporte a la masa de prueba. Por último, se deposita una capa de metalización 526 sobre el electrodo superior 522 con el fin de sellar u obturar herméticamente el acelerómetro con respecto al entorno exterior, tal y como se muestra en la Figura 5C. En una realización, el acelerómetro se fabrica utilizando tecnología de chip integrado basada en MEMS, basada en NEMS o basada en MEMS CMOS.

La Figura 6 representa un corte transversal de un acelerómetro que tiene una realización alternativa de una masa de prueba, de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención. El acelerómetro incluye un electrodo de fondo 602 y un electrodo superior 604. La masa de prueba incluye tres capas metálicas 606, 608 y 610. Sin embargo, solo las capas metálicas 606 y 608 incluyen placas móviles 606a y 608a con muelles o resortes integralmente formados 606b y 608b, respectivamente. La capa de metal 610 incluye una única placa móvil 610, la cual está fijada a la placa móvil superior 606a y a la placa móvil inferior 608a con tirantes o separadores 612 y 614, respectivamente. No existen resortes formados con la placa móvil 610. Semejante disposición hace posible una masa de prueba con una rigidez inferior como consecuencia de la reducción en el número de resortes. Esta disposición puede ser fabricada utilizando una capa de enmascaramiento alternativa que no deja los resortes en la capa metálica 610.

Las Figuras 7A-7C representan cortes transversales de un acelerómetro que tiene su masa de prueba en posiciones diferentes, de acuerdo con realizaciones ilustrativas de la invención. El acelerómetro ilustrado corresponde al acelerómetro de la Figura 3C, en el que se aplican tensiones periódicas a los electrodos superior y de fondo. La Figura 7A muestra la masa de prueba 706 en "posición de reposo", por ejemplo, cuando no hay ninguna aceleración externa. La Figura 7B muestra el desplazamiento de la masa de prueba 706 hacia el electrodo de fondo 704, y, particularmente, cuando esta ha llegado a la "posición preestablecida 1". La Figura 7C muestra el movimiento de la masa de prueba 706 hacia el electrodo superior 702, y, particularmente, cuando esta ha llegado a la "posición preestablecida 2".

Como se ha explicado anteriormente, un procesador en comunicación con el acelerómetro calcula la aceleración basándose en el tiempo que le lleva a la masa de prueba llegar a una de las posiciones preestablecidas y en el desplazamiento de la masa de prueba desde la posición de reposo.

5 En un aspecto, se utiliza un procedimiento de autocalibración para calibrar de forma automática y/o periódica el acelerómetro con el fin de tener en cuenta los cambios en las propiedades de los componentes a lo largo del tiempo o debidos a las variaciones en el procedimiento. Pueden calibrarse automáticamente uno o más parámetros del acelerómetro a fin de mejorar la
10 precisión de una medición proporcionada por el acelerómetro. En una realización, los parámetros determinados son un factor de proporcionalidad de las tensiones aplicadas V_1 y V_2 , un factor de calidad mecánico del acelerómetro, una frecuencia de resonancia del acelerómetro y una frecuencia de resonancia efectiva del acelerómetro.

15 El factor de proporcionalidad de las tensiones aplicadas para una realización del acelerómetro en la que cada uno de los respectivos efectos de la tensión sobre la masa de prueba está completamente descentrado, se expone más adelante. Si no hay variaciones del procedimiento en el curso de la fabricación del acelerómetro, pueden utilizarse entonces simplemente
20 tensiones de igual magnitud. Sin embargo, si existen variaciones en el procedimiento, las tensiones se determinan como sigue. Supóngase que el electrodo superior está separado una distancia g_1 de la masa de prueba, tiene un área efectiva A_1 y genera una capacidad C_1 con la masa de prueba. Supóngase que el electrodo de fondo está separado una distancia g_2 de la
25 masa de prueba, tiene un área efectiva A_2 y genera una capacidad C_2 con la masa de prueba. La fuerza electrostática F_e generada por estos dos electrodos cuando se aplican a ellos, respectivamente, las tensiones V_1 y V_2 , y cuando la masa de prueba es desplazada una distancia x , se calcula como:

$$30 \quad (3) \quad F_e = \frac{\epsilon_0}{2} \left[\frac{V_1^2 A_1}{(g_1 - x)^2} - \frac{V_2^2 A_2}{(g_2 + x)^2} \right]$$

donde x es el desplazamiento de la masa de prueba, y

ϵ_0 es la permisividad en el vacío.

Para desplazamientos x pequeños, esta fuerza electrostática se aproxima

utilizando los dos primeros términos de la expansión en serie de Taylor, como:

$$(4) \quad F_e = \frac{1}{2} \left(\frac{V_1^2 C_1}{g_1} - \frac{V_2^2 C_2}{g_2} \right) + \left(\frac{V_1^2 C_1}{g_1^2} + \frac{V_2^2 C_2}{g_2^2} \right) x, \quad x \ll 1$$

donde:

5

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{A_1}{g_1}, \quad C_2 = \epsilon_0 \frac{A_2}{g_2}$$

La relación existente entre las tensiones aplicadas a los electrodos superior y de fondo tales que sus efectos en la masa de prueba están completamente descentrados, se calculan como:

10

$$(5) \quad \frac{V_1^2 C_1}{g_1} = \frac{V_2^2 C_2}{g_2}$$

lo que es equivalente a:

15

$$(6) \quad V_2 = V_1 \frac{g_2}{g_1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}$$

Si los electrodos del acelerómetro son simétricos y el acelerómetro tiene variaciones nulas en el procedimiento (es decir, $g_1 = g_2$ y $A_1 = A_2$), las tensiones requeridas son entonces las mismas ($V_2 = V_1$). Si existen

20

variaciones en el procedimiento, el factor de proporcionalidad $\frac{g_2}{g_1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}$ que se

necesita para que se satisfaga la ecuación (6) puede ser determinado aplicando una única tensión V_1 al electrodo de fondo y, a continuación, desconectándola y aplicando una tensión V_2 de igual valor al electrodo superior, y desconectándola. Se mide el tiempo t_1 y t_2 transcurrido en cada caso para que la masa de prueba llegue a la posición preestablecida. Basándose en estos datos, se calcula el factor de proporcionalidad como:

25

$$(7) \quad \frac{g_2}{g_1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} = \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2,$$

donde g_1 es la distancia del electrodo superior desde la masa de prueba,

g_2 es la distancia del electrodo de fondo desde la masa de prueba,

A_1 es el área efectiva del electrodo superior,

A_2 es el área efectiva del electrodo de fondo, y

t_1 y t_2 son los tiempos transcurridos para que la masa de prueba llegue a la posición preestablecida.

5

El factor de proporcionalidad $\frac{g_2}{g_1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}$ se determina,

alternativamente, basándose en la corriente que fluye por la masa de prueba.

Se aplica una de las tensiones V_1 o V_2 con un valor fijo, y la otra tensión se hace variar desde un valor de tensión baja hasta un valor de tensión alta. A

10

medida que se varía el valor de la tensión, la dirección de la masa de prueba cambia y se invierte el flujo de corriente a través de la masa de prueba. El valor de la tensión en que se produce este cambio es el punto en que se hacen iguales las dos fuerzas electrostáticas. El factor de proporcionalidad se

15

determina entonces introduciendo el valor de tensión fijo y el valor de tensión modificado en la ecuación (6), y las tensiones V_1 y V_2 se ajustan en correspondencia.

El factor de calidad mecánico Q del acelerómetro es un parámetro adimensional que describe cuán subamortiguada es una oscilación.

Cuando se aplican fuerzas electrostáticas a la masa de prueba y, a continuación, se desconectan o desactivan, la masa de prueba resuena durante un cierto periodo de tiempo antes de llegar a una posición de reposo.

20

El factor de calidad mecánico Q puede ser medido mediante la desconexión de las fuerzas electrostáticas y el cómputo del número de ciclos N que le lleva a la masa de prueba llegar a su posición de reposo. El factor de calidad

25

meccánico Q se calcula entonces como:

$$(8) \quad Q = \frac{2\pi}{N},$$

donde N es el número de ciclos que le

lleva a la masa de prueba llegar a su posición de reposo.

Si las fuerzas electrostáticas no se desconectan de una forma controlada, la masa de prueba puede experimentar grandes oscilaciones antes de retornar a

30

su posición de reposo. Por ejemplo, para un factor de calidad mecánico Q elevado, por ejemplo, 1.000, se necesita un periodo de tiempo largo para permitir que la masa de prueba llegue a su posición de reposo. Este periodo

de tiempo largo se proporciona cada vez que se mide una aceleración externa utilizando el acelerómetro. En una realización, las tensiones periódicas que excitan las fuerzas electrostáticas son desconectadas de un modo controlado, de tal manera que la masa de prueba llega a la posición de reposo en un periodo de tiempo más corto. En otra realización, se implementan diversos acelerómetros en paralelo, y los circuitos de control son multiplexados para trabajar con uno de los acelerómetros en un momento dado, al tiempo que permiten que los demás acelerómetros alcancen sus respectivas posiciones de reposo. En aún otra realización, el circuito de DLL en comunicación con el acelerómetro está configurado para supervisar el ciclo de trabajo de una masa de prueba mantenida en un movimiento sustancialmente continuo. Las tensiones periódicas aplicadas provocan el movimiento periódico de la masa de prueba, lo que da como resultado un disparo periódico del amplificador de carga y, en consecuencia, del comparador, a la misma frecuencia que las tensiones periódicas. Sin embargo, el ciclo de trabajo de la salida del comparador depende de la aceleración externa experimentada por el acelerómetro. Este ciclo de trabajo puede ser medido conjuntamente con el periodo de tiempo requerido para que la masa de prueba llegue a la posición preestablecida, utilizando el circuito de DLL adaptado. El ciclo de trabajo y el periodo de tiempo pueden utilizarse para determinar la aceleración externa sin que exista interrupción en las tensiones periódicas aplicadas.

A continuación, se explicará el modo como determinar la frecuencia de resonancia ω_0 del acelerómetro. En este caso, se aplica una tensión V_1 o una tensión V_2 como tensión de CA (corriente alterna –“AC (alternating current)”). Se aplica un intervalo de valores de frecuencia en torno a una frecuencia de resonancia esperada, y se determina la frecuencia que produce un desplazamiento más grande de la masa de prueba. En los casos con un factor de calidad mecánico, Q , grande, la resolución en frecuencia, f_r , del intervalo de valores de frecuencia se calcula como:

$$(9) \quad f_r \leq \frac{f_0}{2Q}$$

$$\text{donde } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

La frecuencia de resonancia efectiva ω_{0T} es la frecuencia de resonancia cuando se aplica una tensión a uno de los electrodos. Cabe

esperar que este valor de frecuencia de resonancia sea complejo y no pueda ser medido directamente para realizaciones que tengan un equilibrio estable entre la masa de prueba y los electrodos del acelerómetro. Sin embargo, el valor de la frecuencia de resonancia puede ser medido para realizaciones que tengan un estado estable según se ha descrito anteriormente con referencia a la frecuencia de resonancia ω_0 . Se aplica una tensión V_1 tal, que la masa de prueba y los electrodos se encuentran en un estado estable, típicamente un valor de tensión bajo, y se determina el parámetro D a partir de la siguiente ecuación:

$$(10) \quad \omega_{0T}^2(V_1) = \omega_0^2 - \left[\frac{C_1}{mg_1} \left(\frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} \right) \right] V_1^2 = \omega_0^2 - DV_1^2$$

$$\text{donde } D = \frac{C_1}{mg_1} \left(\frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} \right),$$

ω_0 es la frecuencia de resonancia determinada,

g_1 es la distancia del electrodo superior desde la masa de prueba,

g_2 es la distancia del electrodo de fondo desde la masa de prueba,

C_1 es la capacidad generada entre el electrodo superior y la masa de prueba, y

V_1 es la tensión aplicada al electrodo superior.

El valor del parámetro D es constante para diferentes valores de V_1 y ω_{0T}^2 , y, en consecuencia, puede calcularse ω_{0T} utilizando un valor de tensión aplicada V_1 y el valor determinado del parámetro D en la ecuación (10).

En una realización, un procesador incluido en un acelerómetro (por ejemplo, el procesador 320 de las Figuras 3A-3C) determina la aceleración experimentada por el acelerómetro basándose en la medición del tiempo que tarda la masa de prueba del acelerómetro en llegar a la posición preestablecida o en alcanzar una velocidad preestablecida, y así como en valores de parámetros autocalibrados para la frecuencia de resonancia ω_0 , la frecuencia de resonancia efectiva ω_{0T} y el factor de calidad mecánico Q . El procesador controla las fuentes de tensión para aplicar un intervalo de tensiones V_1 o V_2 a los electrodos, y construye una tabla de consulta en la memoria relativa a los parámetros autocalibrados, la medición del tiempo y la aceleración. Una vez que se ha generado la tabla de consulta, el procesador determina la aceleración experimentada por el acelerómetro al recuperar de una tabla de consulta un valor de aceleración basado en la medición del

tiempo y en otros valores de parámetros autocalibrados.

En una realización alternativa, un procesador incluido en un acelerómetro determina la aceleración experimentada por el acelerómetro basándose en el desplazamiento de la masa de prueba del acelerómetro y en valores de parámetros autocalibrados para una tensión de funcionamiento V_0 y una frecuencia de resonancia ω_0 . En una realización, la tensión V_0 oscila entre aproximadamente 1 V y aproximadamente 2 V. La aceleración a se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$(11) \quad a = \omega_0^2 x + x_0 - B$$

El descentramiento x_0 corresponde al desplazamiento de la masa de prueba en una posición de reposo. Con el fin de determinar x_0 , el procesador controla una fuente de tensión para aplicar una tensión V en uno de los electrodos y generar una nueva frecuencia de resonancia ω_{0T}^2 . Sin embargo, la aplicación de esta tensión V genera una fuerza electrostática adicional que afecta a la posición de reposo de la masa de prueba. Esto añade otra variable a la ecuación, representada por el término B en la ecuación (11). Para determinar B , el procesador controla la fuente de tensión con el fin de aplicar otra tensión, nV , que es n veces la tensión V , y ello da como resultado una nueva frecuencia de resonancia $n^2\omega_{0T}^2$. suponiendo que el desplazamiento de la masa de prueba es x_1 en la frecuencia de resonancia ω_0 , x_2 en la frecuencia de resonancia ω_{0T}^2 , y x_3 en la frecuencia de resonancia $n^2\omega_{0T}^2$, el descentramiento x_0 y el término B pueden calcularse a partir del siguiente sistema de ecuaciones:

$$(12) \quad a = \omega_0^2 (x_1 - x_0) = \omega_{0T}^2 (x_2 - x_0) - B = n^2\omega_{0T}^2 (x_3 - x_0) - n^2B$$

Una vez que se conocen x_0 y B , el procesador determina la aceleración experimentada por el acelerómetro utilizando el desplazamiento de la masa de prueba, x , y la frecuencia de resonancia ω_0 en la ecuación (11). El desplazamiento de la masa de prueba, x , puede determinarse con la ayuda de un amplificador de carga según se ha descrito con referencia a las Figuras 3A-

3C. La frecuencia de resonancia ω_0 se determina según se ha descrito anteriormente.

El presente Solicitante considera que todas las combinaciones susceptibles de ponerse en funcionamiento y pertenecientes a las realizaciones aquí descritas son materia objeto patentable. Los expertos de la técnica tendrán conocimiento, o serán capaces de imaginar, con no más que el uso de la experimentación rutinaria, muchos equivalentes de las realizaciones y prácticas que se han descrito en la presente memoria. Por ejemplo, si bien se la descrito la masa de prueba del acelerómetro de manera que tiene un movimiento fuera del plano (dirección z), las realizaciones y prácticas pueden ser igualmente aplicables a una masa de prueba del acelerómetro que tenga un movimiento dentro del plano (esto es, en las direcciones x y/o y). De acuerdo con ello, se comprenderá que los sistemas y métodos aquí descritos no se han de limitar a las realizaciones divulgadas en la presente memoria, sino que debe comprenderse por las reivindicaciones que se acompañan que se han de interpretar en sentido tan amplio como se permita por la ley. Debe apreciarse también que, si bien las reivindicaciones siguientes se han dispuesto de un modo concreto tal, que ciertas reivindicaciones dependen de otras reivindicaciones, ya sea directa o indirectamente, cualquiera de las reivindicaciones que siguen puede depender de cualquiera de las siguientes reivindicaciones, ya sea directa o indirectamente, a fin de llevar a cabo una cualquiera de las diversas realizaciones que se han descrito aquí.

25

30

35

REIVINDICACIONES

1. Un método para hacer funcionar un acelerómetro de MEMS que
5 tiene una masa de prueba, el cual comprende:

aplicar periódicamente un primer voltaje o tensión a un primer
electrodo situado próximo a la masa de prueba, con lo que se aplica una
fuerza electrostática a la masa de prueba para arrastrar la masa de prueba
hacia una posición preestablecida entre la posición de reposo y el primer
10 electrodo;

recibir una aceleración externa en el acelerómetro, de tal manera
que la aceleración externa altera un tiempo que le lleva a la masa de prueba
llegar a la posición preestablecida en respuesta a la tensión aplicada;

determinar que la masa de prueba ha llegado a la posición
15 preestablecida;

medir un tiempo que le lleva a la masa de prueba llegar a la
posición preestablecida;

determinar una magnitud y una dirección de la aceleración
externa basándose en el tiempo medido.

20 2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que
determinar que la masa de prueba ha llegado a la posición preestablecida
comprende:

medir un voltaje o tensión correspondiente a una carga
almacenada en el primer electrodo; y

25 comparar la tensión medida con una tensión predeterminada
correspondiente al hecho de que la masa de prueba llegue a la posición
preestablecida.

3. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el cual medir el
tiempo comprende utilizar un circuito de línea o conducción de retardo digital
30 para medir un tiempo entre un borde de la primera tensión periódica y un
instante en que la tensión medida iguala la tensión predeterminada.

4. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el cual medir la
tensión comprende medir la tensión utilizando un amplificador de carga.

5. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende
35 aplicar periódicamente un segundo voltaje o tensión a un segundo electrodo

situado próximo a la masa de prueba, de tal manera que el segundo electrodo está situado en un lado de la masa de prueba opuesto al del primer electrodo, y de tal modo que la aplicación de la segunda tensión está sincronizada con la aplicación de la primera tensión periódica al primer electrodo.

5 6. El método de acuerdo con la reivindicación 5, en el cual la aplicación de la segunda tensión genera una fuerza electrostática en la masa de prueba que descentra por completo la fuerza electrostática generada por la aplicación de la primera tensión periódica.

10 7. El método de acuerdo con la reivindicación 5, que comprende determinar las magnitudes de las primera y segunda tensiones periódicas después de la fabricación del acelerómetro.

8. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el cual medir el tiempo comprende medir el tiempo por medio de un circuito de línea o conducción de retardo digital.

15 9. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el cual el tiempo medido oscila entre aproximadamente 1 picosegundo y aproximadamente 100 picosegundos.

20 10. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el cual la masa de prueba tiene una masa que oscila entre aproximadamente 1 nanogramo y aproximadamente 100 nanogramos.

11. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende calibrar automáticamente uno o más parámetros del acelerómetro con el fin de mejorar la precisión de una medición proporcionada por el acelerómetro.

25 12. El método de acuerdo con la reivindicación 10, en el cual calibrar automáticamente uno o más parámetros del acelerómetro comprende determinar al menos uno de entre una frecuencia de resonancia, una frecuencia de resonancia efectiva y un factor de calidad mecánico del acelerómetro.

30 13. Un método para hacer funcionar un acelerómetro de MEMS que tiene una masa de prueba, el cual comprende:

aplicar periódicamente un primer voltaje o tensión a un primer electrodo situado próximo a la masa de prueba, con lo que se aplica una fuerza electrostática a la masa de prueba para arrastrar la masa de prueba hacia el primer electrodo;

35 recibir una aceleración externa en el acelerómetro, de tal manera

que la aceleración externa altera un tiempo que le lleva a la masa de prueba alcanzar una velocidad preestablecida en respuesta a la tensión aplicada;

determinar que la masa de prueba ha alcanzado la velocidad preestablecida;

5 medir un tiempo que le lleva a la masa de prueba llegar alcanzar la velocidad preestablecida;

determinar una magnitud y una dirección de la aceleración externa basándose en el tiempo medido.

14. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que
10 determinar que la masa de prueba ha alcanzado la velocidad preestablecida comprende:

medir un voltaje o tensión correspondiente a una corriente hacia el primer electrodo; y

15 comparar la tensión medida con una tensión predeterminada correspondiente al hecho de que la masa de prueba alcance la velocidad preestablecida.

15. El método de acuerdo con la reivindicación 14, en el cual medir el tiempo comprende utilizar un circuito de línea o conducción de retardo digital para medir un tiempo entre un borde de la primera tensión periódica y un
20 instante en que la tensión medida iguala la tensión predeterminada.

16. El método de acuerdo con la reivindicación 14, en el cual medir la tensión comprende medir la tensión utilizando un convertidor de corriente en tensión.

17. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende
25 aplicar periódicamente un segundo voltaje o tensión a un segundo electrodo situado próximo a la masa de prueba, de tal manera que el segundo electrodo está situado en un lado de la masa de prueba opuesto al del primer electrodo, y de tal modo que la aplicación de la segunda tensión está sincronizada con la aplicación de la primera tensión periódica al primer electrodo.

30 18. El método de acuerdo con la reivindicación 17, en el cual la aplicación de la segunda tensión genera una fuerza electrostática en la masa de prueba que descentra por completo la fuerza electrostática generada por la aplicación de la primera tensión periódica.

19. El método de acuerdo con la reivindicación 17, que comprende
35 determinar las magnitudes de las primera y segunda tensiones periódicas

después de la fabricación del acelerómetro.

20. El método de acuerdo con la reivindicación 13, en el cual medir el tiempo comprende medir el tiempo por medio de un circuito de línea o conducción de retardo digital.

5 21. El método de acuerdo con la reivindicación 13, en el cual el tiempo medido oscila entre aproximadamente 1 picosegundo y aproximadamente 100 picosegundos.

22. El método de acuerdo con la reivindicación 13, en el cual la masa de prueba tiene una masa que oscila entre aproximadamente 1 nanogramo y
10 aproximadamente 100 nanogramos.

23. El método de acuerdo con la reivindicación 13, que comprende:
calibrar automáticamente uno o más parámetros del
acelerómetro con el fin de mejorar la precisión de una medición proporcionada
por el acelerómetro.

15 24. El método de acuerdo con la reivindicación 13, en el cual calibrar automáticamente uno o más parámetros del acelerómetro comprende determinar al menos uno de entre una frecuencia de resonancia, una frecuencia de resonancia efectiva y un factor de calidad mecánico del
acelerómetro.

20 25. Un aparato para analizar la aceleración de una masa de prueba de un acelerómetro de MEMS que tiene una masa de prueba, el cual comprende:

una primera fuente de voltaje o tensión, destinada a aplicar
periódicamente una primera tensión a un primer electrodo situado próximo a la
25 masa de prueba, con lo que se aplica una fuerza electrostática a la masa de
prueba para arrastrar la masa de prueba hacia el primer electrodo;

un primer comparador para comparar un voltaje o tensión
correspondiente a la velocidad de la masa de prueba con una tensión
predeterminada, a fin de determinar que la masa de prueba ha alcanzado una
30 velocidad preestablecida;

un circuito de línea o conducción de retardo digital, destinado a
medir un tiempo que le lleva a la masa de prueba alcanzar la velocidad
preestablecida;

un procesador para determinar una magnitud y una dirección de
35 una aceleración externa aplicada al acelerómetro, basándose en el tiempo

medido.

26. Un aparato para analizar la aceleración de una masa de prueba de un acelerómetro de MEMS que tiene una masa de prueba, el cual comprende:

5 una primera fuente de voltaje o tensión, destinada a aplicar periódicamente una primera tensión a un primer electrodo situado próximo a la masa de prueba, con lo que se aplica una fuerza electrostática a la masa de prueba para arrastrar la masa de prueba hacia el primer electrodo;

10 un primer comparador para comparar un voltaje o tensión correspondiente a la posición de la masa de prueba con una tensión predeterminada, a fin de determinar que la masa de prueba ha llegado a una posición preestablecida;

15 un circuito de línea o conducción de retardo digital, destinado a medir un tiempo que le lleva a la masa de prueba llegar a la posición preestablecida;

un procesador para determinar una magnitud y una dirección de una aceleración externa aplicada al acelerómetro, basándose en el tiempo medido.

20 27. Un método para hacer funcionar un acelerómetro de MEMS que tiene una masa de prueba, el cual comprende:

25 aplicar un primer voltaje o tensión a un primer electrodo situado próximo a la masa de prueba, con lo que se aplica una fuerza electrostática que induce la vibración de la masa de prueba a una primera frecuencia de resonancia y, subsiguientemente, desplaza la masa de prueba en un primer desplazamiento;

30 aplicar un segundo voltaje o tensión al primer electrodo situado próximo a la masa de prueba, con lo que se aplica una fuerza electrostática que induce la vibración de la masa de prueba a una segunda frecuencia de resonancia y, subsiguientemente, desplaza la masa de prueba en un segundo desplazamiento;

35 aplicar un tercer voltaje o tensión al primer electrodo situado próximo a la masa de prueba, con lo que se aplica una fuerza electrostática que induce la vibración de la masa de prueba a una tercera frecuencia de resonancia y, subsiguientemente, desplaza la masa de prueba en un tercer desplazamiento, de tal manera que la tercera tensión periódica es un múltiplo

de la segunda tensión periódica; y

determinar un descentramiento con respecto a una posición de reposo para la masa de prueba, basándose en las tensiones periódicas aplicadas, en las frecuencias de resonancia y en los desplazamientos.

5 28. El método de acuerdo con la reivindicación 27, que comprende adicionalmente:

aplicar la primera tensión al primer electrodo situado próximo a la masa de prueba;

10 recibir una aceleración externa en el acelerómetro, de tal manera que la aceleración externa altera el desplazamiento de la masa de prueba hasta un nuevo desplazamiento;

determinar el nuevo desplazamiento de la masa de prueba; y

15 determinar una magnitud de la aceleración externa basándose en la primera frecuencia de resonancia, en el descentramiento determinado y en el nuevo desplazamiento.

29. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el cual la masa de prueba comprende al menos una capa de metal.

20

25

30

35

1/10

Fig. 1A

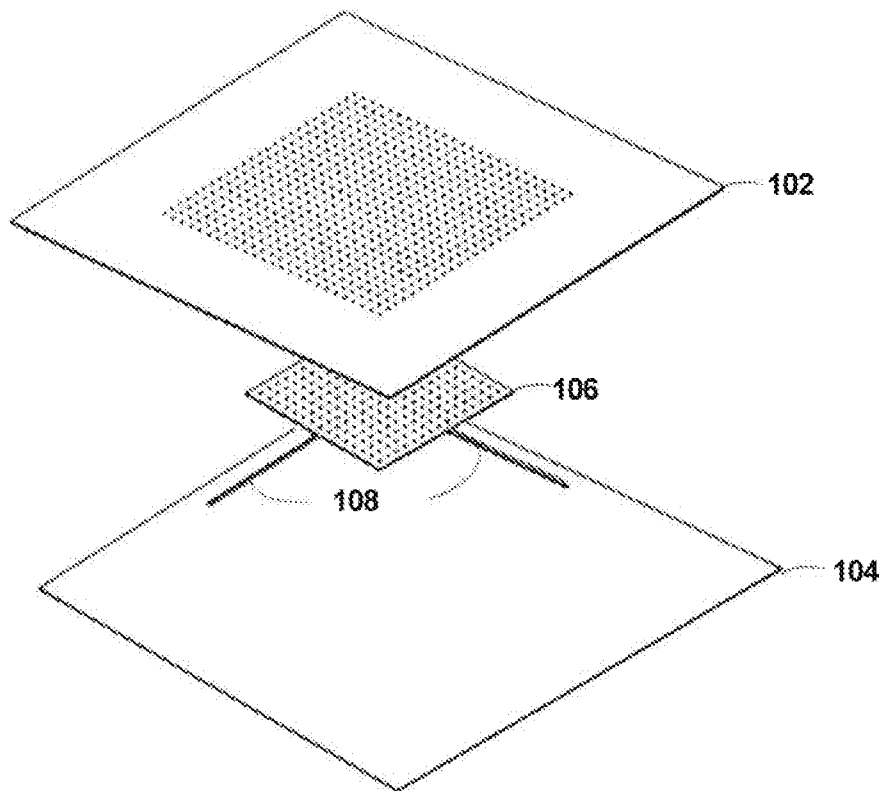


Fig.1B

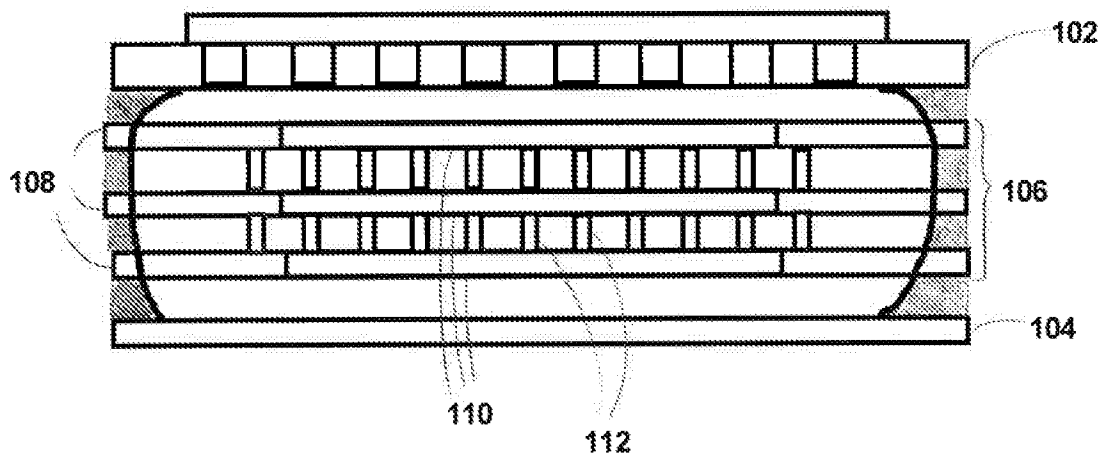


Fig. 2

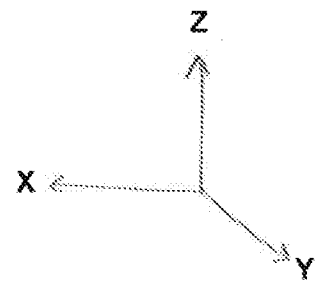
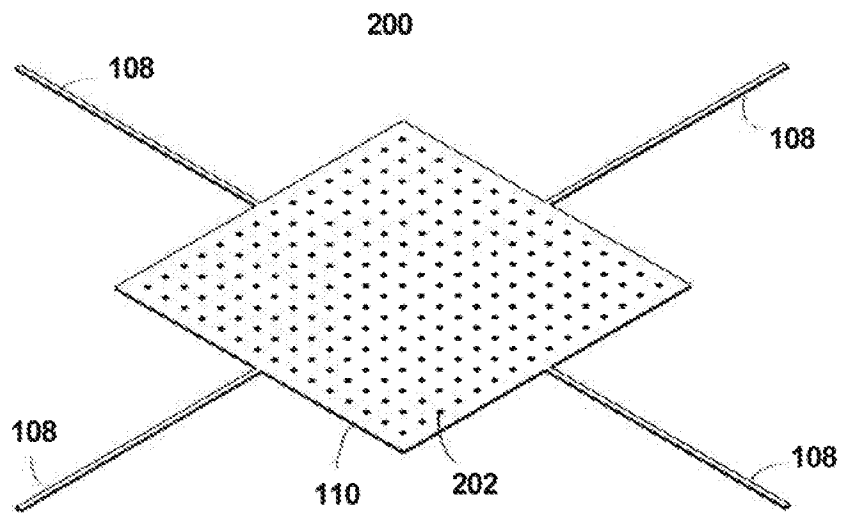


Fig. 3A

300

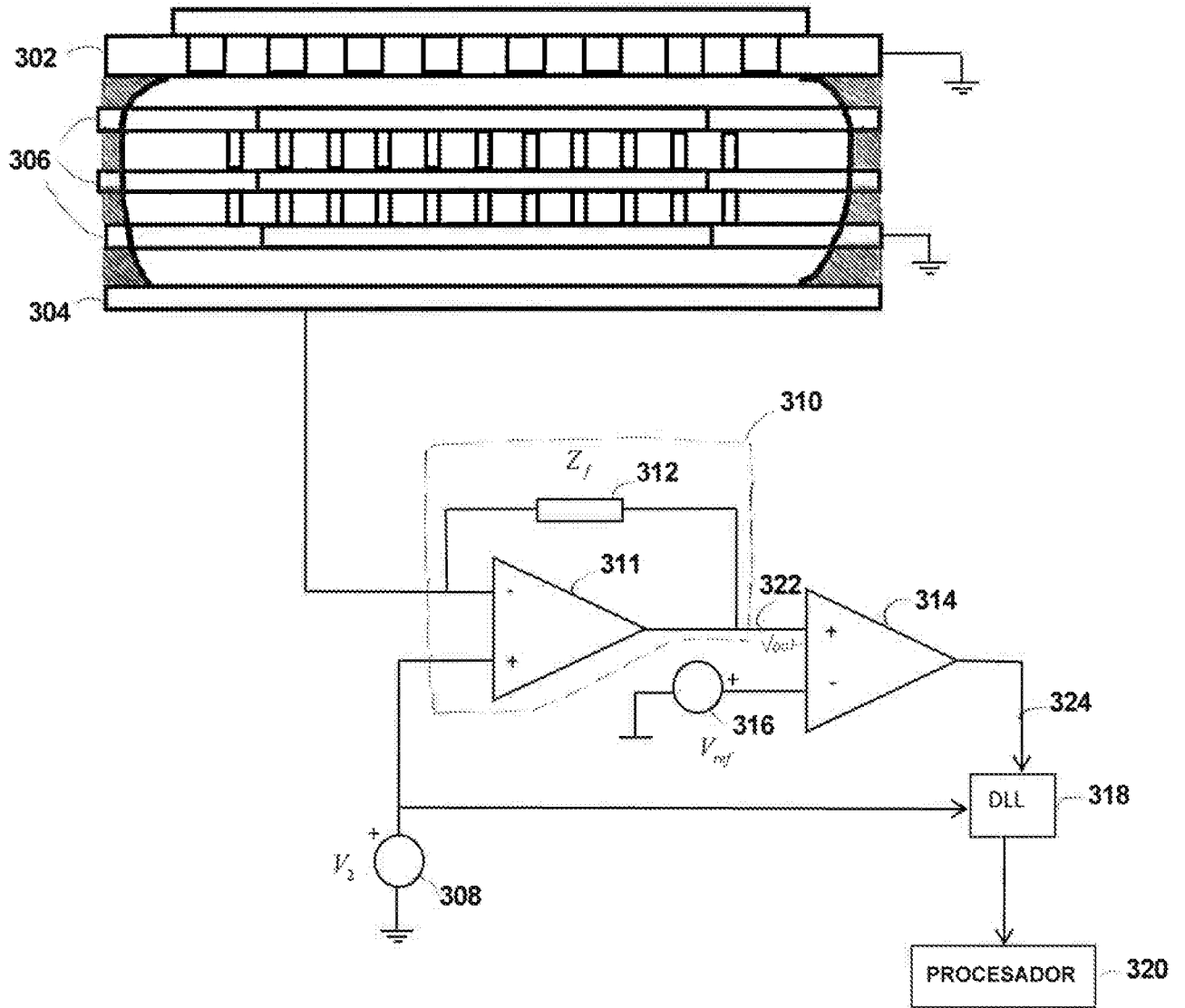
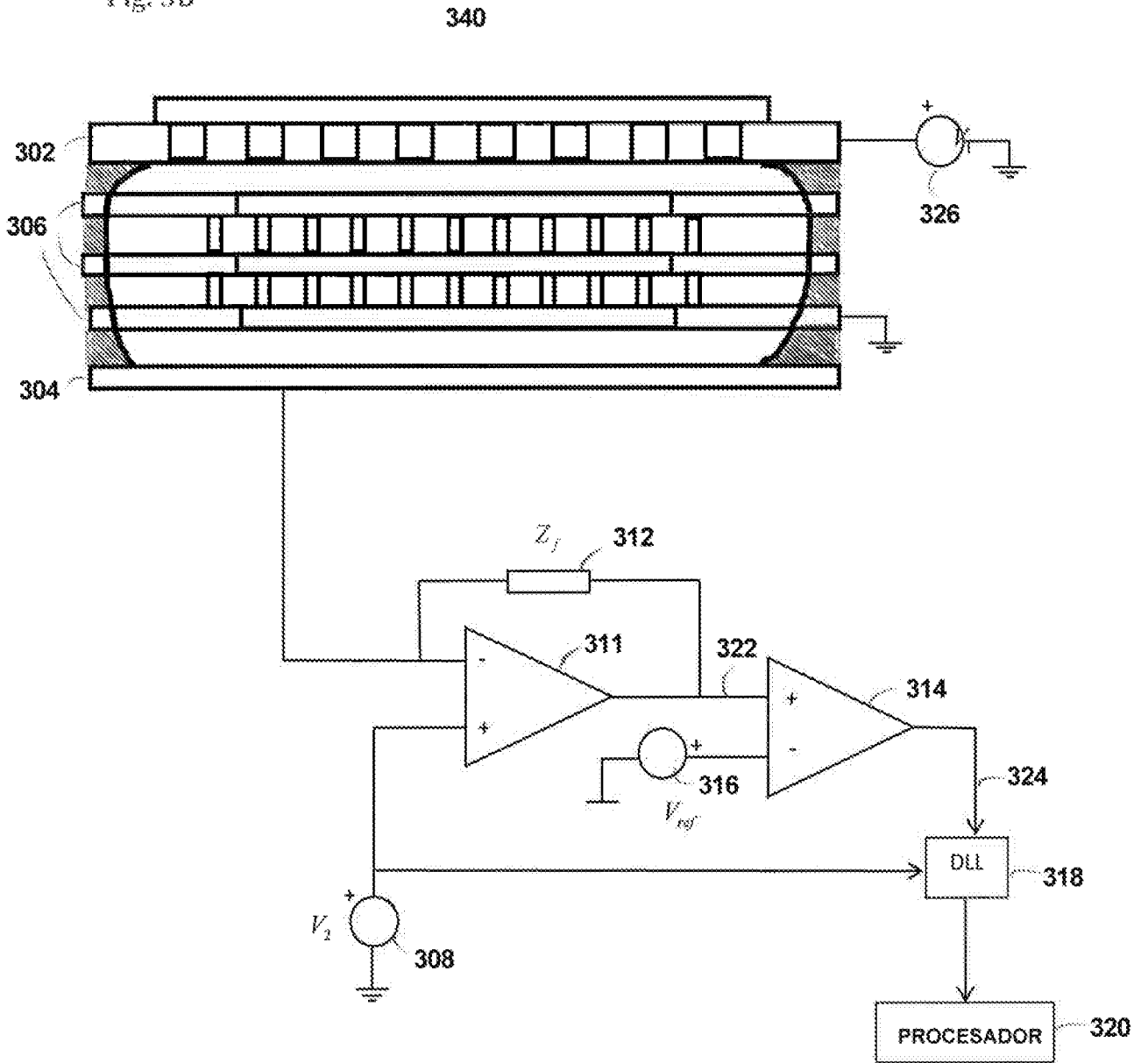
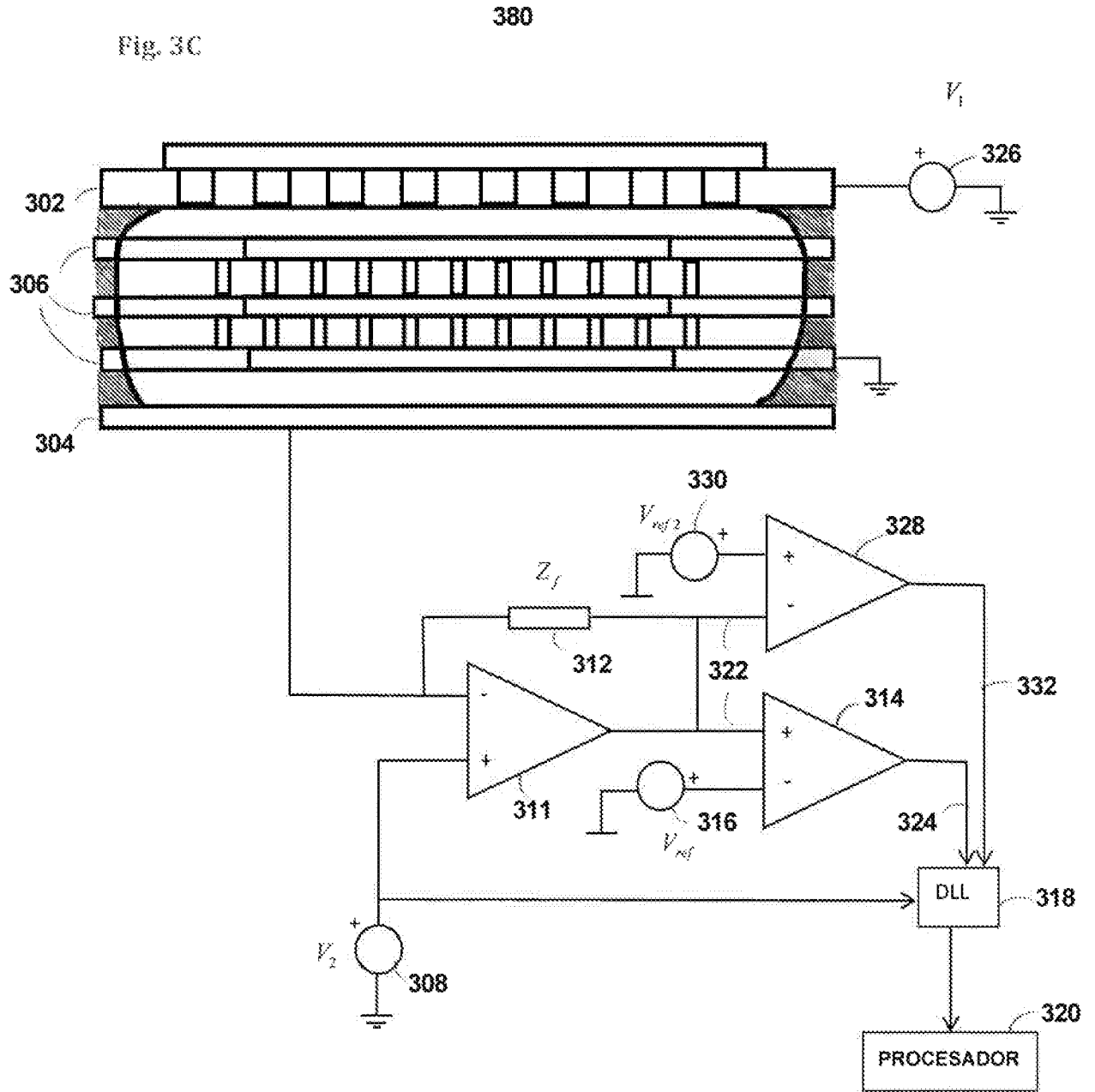


Fig. 3B





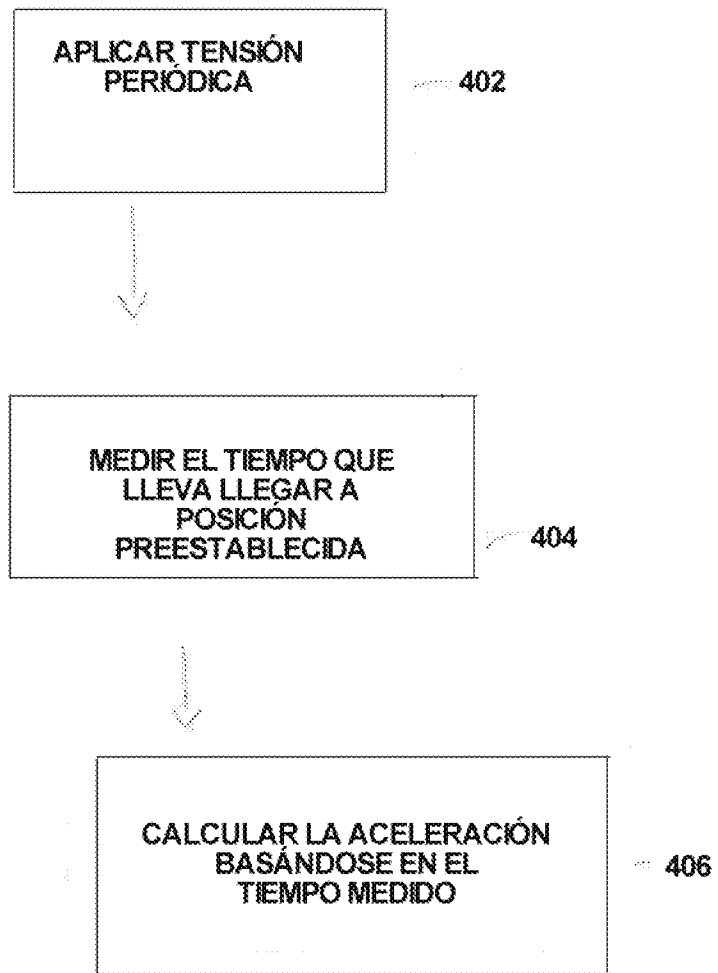


Fig. 4

Fig. 5A

500

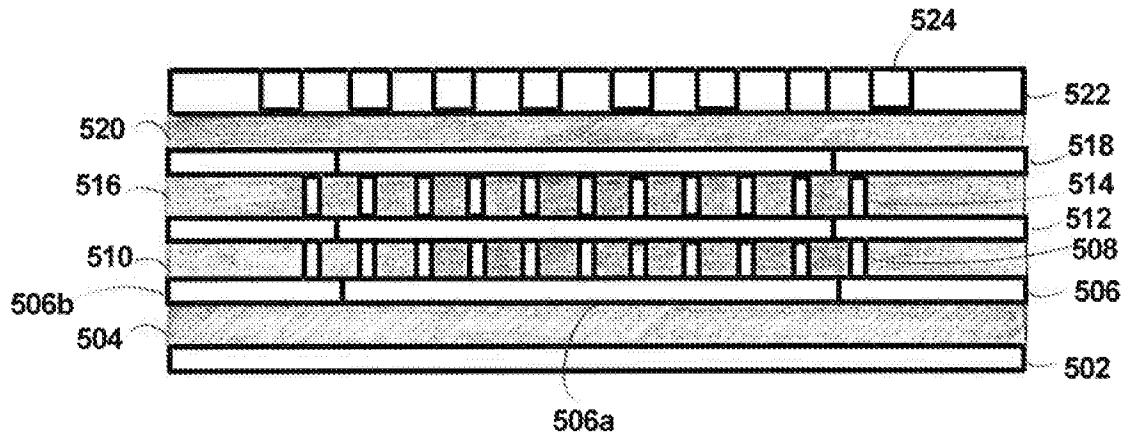
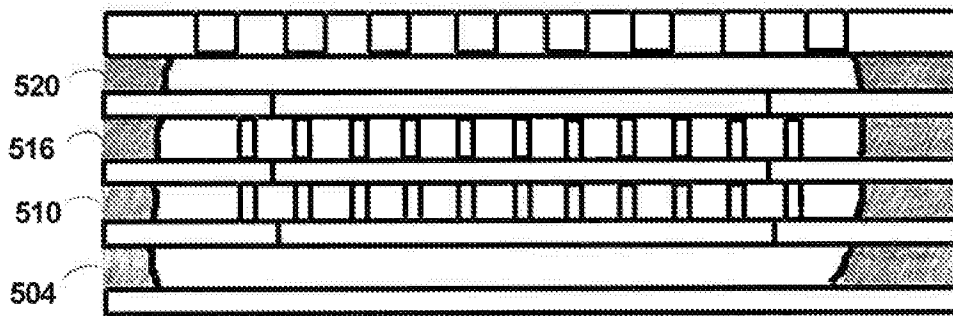


Fig. 5B

540



580

Fig. 5C

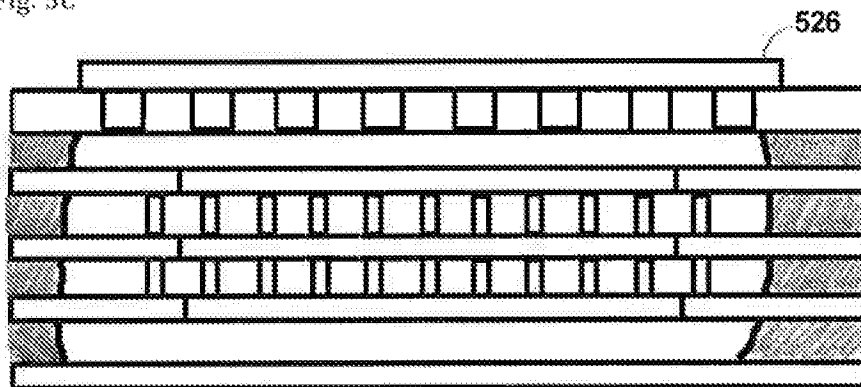


Fig. 6

600

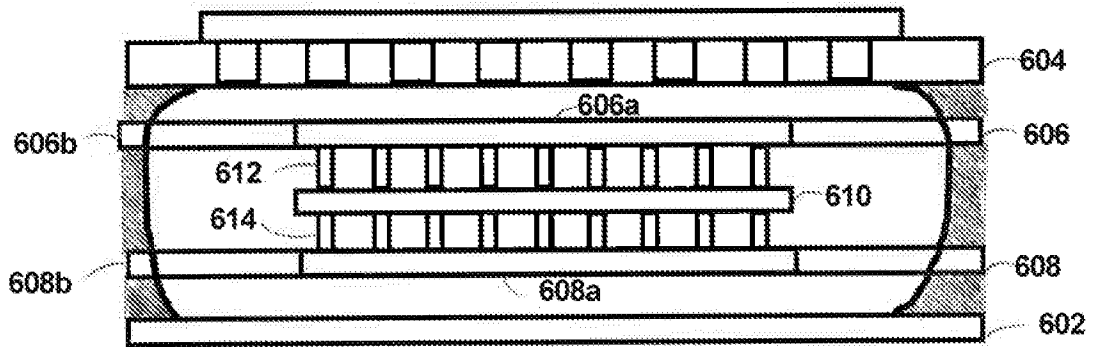


Fig. 7A

700

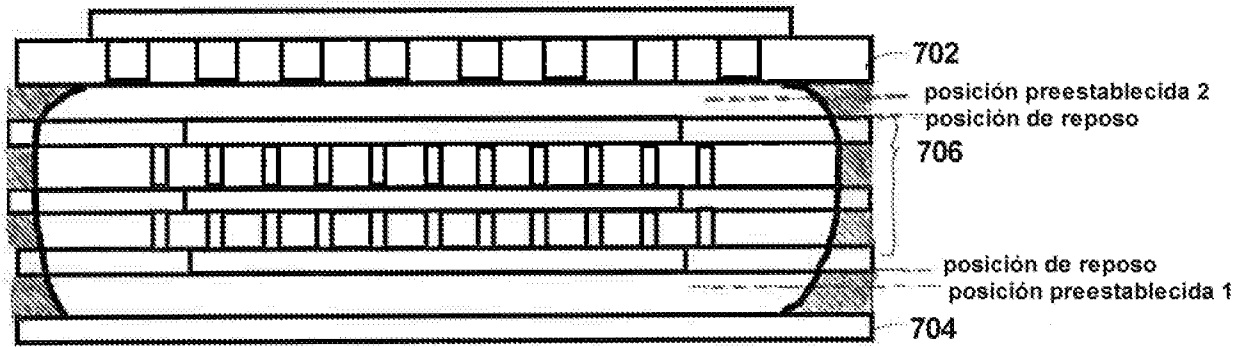


Fig. 7B

740

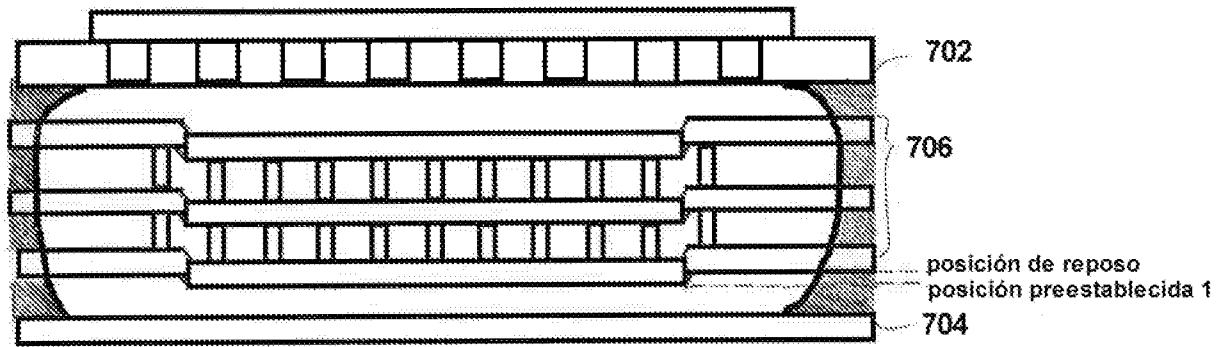


Fig. 7C

780

